

L'ABONDANCE DU BERYLLIUM DANS L'ATMOSPHERE SOLAIRE

THESE

présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Genève
pour obtenir le grade de docteur ès sciences, —
mention astronomie et astrophysique

par

Yves CHMIELEWSKI

de

TOURS (France)

Thèse No 1714

Texte condensé de la thèse No 1714, approuvée par la Faculté des sciences. Des copies en microfilms du texte complet peuvent être obtenues auprès de la Bibliothèque publique et universitaire de Genève. Le texte complet peut être consulté à cette bibliothèque ou à la Bibliothèque nationale suisse à Berne.

L'ABONDANCE DU BERYLLIUM DANS L'ATMOSPHERE SOLAIRE

THESE

présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Genève
pour obtenir le grade de docteur ès sciences,
mention astronomie et astrophysique

par

Yves CHMIELEWSKI

de

TOURS (France)

Thèse No 1714

Texte condensé de la thèse No 1714, approuvée par la Faculté des sciences. Des copies en microfilms du texte complet peuvent être obtenues auprès de la Bibliothèque publique et universitaire de Genève. Le texte complet peut être consulté à cette bibliothèque ou à la Bibliothèque nationale suisse à Berne.

La Faculté des sciences, sur le préavis du professeur ordinaire E.A. Muller, directeur de thèse et d'une Commission composée des professeurs ordinaires P.B. Bouvier et M. Golay (Faculté des sciences), et du professeur L.N. Houziaux (Université de Mons), autorise l'impression de la présente thèse, sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont énoncées.

Genève, le 6 août 1975

Le doyen :
Jean Muller

Thèse No 1714



1. Introduction

La nucléosynthèse des éléments légers (D, He, Li, Be, B) présente de nombreux caractères particuliers en raison de la facilité avec laquelle leurs noyaux sont détruits et de la spécificité des conditions dans lesquelles ils peuvent être formés. Ces propriétés impliquent que les abondances de ces éléments dans les différents constituants de la Galaxie fournissent des contraintes assez strictes aux théories de la formation et de l'évolution de l'Univers aussi bien que de la Galaxie elle-même. Leur abondance dans l'atmosphère du Soleil est particulièrement intéressante. D'abord parce que les abondances solaires sont souvent les plus précises et qu'elles servent de référence aux abondances obtenues pour les autres astres. Ensuite parce qu'elles reflètent plus ou moins l'abondance "cosmique" des éléments à l'époque de la formation du Soleil et qu'il est ainsi très intéressant de les comparer aux abondances obtenues pour les mêmes éléments dans des étoiles d'âge différent ou encore dans la matière interstellaire (abondance actuelle).

Le béryllium est l'un de ces éléments légers. Les déterminations les plus récentes de son abondance solaire (Grevesse 1969 ; Hauge et Engvold, 1969 ; Ross et Aller, 1974)

reposent entièrement sur l'analyse de spectrogrammes du doublet de résonance de l'ion Be II dans le proche ultraviolet, région où les effets de superposition des raies ("blends") et où la nature de l'opacité continue posent de graves problèmes d'interprétation. Qui plus est, toutes ces analyses ont été effectuées dans le cadre de l'approximation de l'Equilibre Thermodynamique Local (ETL) dont la validité n'est pas toujours assurée. Ce sont ces différents points qui ont été examinés plus en détail dans la présente étude.

2. Les observations

Nous avons entrepris la redétermination de l'abondance solaire du béryllium à partir d'observations centre-bord à très haute résolution obtenues au moyen du télescope et du spectrographe solaires du Kitt Peak National Observatory. L'examen de ces observations a permis de confirmer les conclusions de Grevesse (1968) et de Hauge et Engvold (1968) concernant l'absence du triplet Be I $\lambda 3321.2\text{\AA}$ dans le spectre solaire. La détermination de l'abondance du béryllium à partir d'observations obtenues depuis la surface de la terre, repose donc entièrement sur l'interprétation du doublet de résonance à $\lambda 3130.6\text{\AA}$ du Be II. L'examen du comportement centre-bord de cette région révèle le caractère composite des profils d'absorption associés à ce doublet.

3. Spectres synthétiques en ETL

Nous avons commencé par tenter de décrire le spectrogramme observé en appliquant la méthode classique du calcul de spectres synthétiques dans l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique local (ETL). S'il a été possible de parvenir à une très

bonne représentation des spectrogrammes observés par les spectres synthétiques, à $\mu = 1.0$ aussi bien qu'à $\mu = 0.2$, les abondances du béryllium qu'impliquaient ces calculs pour chacune des positions sur le disque différaient par trop, leur rapport étant supérieur à 3. Cet échec de la méthode de synthèse spectrale en ETL illustre un problème plus général et fait ressortir que, bien qu'elle permette généralement de reproduire assez aisément les spectrogrammes observés au centre du disque solaire, seule la reconstitution théorique du comportement centre-bord de ces spectrogrammes permet de s'assurer du caractère adéquat des hypothèses contenues dans la méthode d'interprétation.

4. L'opacité continue

Les raies de résonance du Be II se trouvent dans une région du spectre où le problème bien connu de l'insuffisance des opacités continues théoriques de l'ultraviolet se pose déjà avec acuité. Nous avons donc d'abord pensé à attribuer le désaccord entre le comportement centre-bord des spectres théoriques et celui des spectres observés à cette insuffisance. Après avoir passé en revue l'ensemble des hypothèses proposées à ce jour quant à la nature des sources d'opacité additionnelle, nous proposons un modèle empirique qui tente de décrire les variations de cette opacité en fonction de la profondeur dans l'atmosphère solaire. Ce modèle est spécifiquement adapté aux problèmes de synthèse spectrale et ne tient pas compte de l'effet des raies résolues du spectre comme c'est le cas de divers autres modèles présentés antérieurement et qui avaient plutôt pour but

de décrire l'effet total de l'opacité additionnelle et du blocage du rayonnement par les raies afin de construire des modèles théoriques de l'atmosphère solaire. Nous avons utilisé ce modèle pour recalculer des spectres synthétiques en ETL tenant compte de l'effet de l'opacité additionnelle : nous montrons que si le désaccord est plus faible que lors des calculs antérieurs, il reste encore trop élevé. Nous en concluons qu'il convient alors de mettre en cause l'hypothèse de l'ETL.

5. Décomposition du blend à 3131.07 Å

Ayant renoncé à utiliser les méthodes fondées sur cette hypothèse, nous avons dû entreprendre un calcul détaillé de l'équilibre d'ionisation et d'excitation du béryllium dans l'atmosphère solaire, dans le cadre du formalisme plus général de l'équilibre cinétique (EC). Ce formalisme se prête cependant plus difficilement à la synthèse spectrale de blends, d'autant plus, dans notre cas particulier, que l'une des composantes du blend que nous avons choisi d'étudier n'avait pu être identifiée. Nous devons donc essayer de reconstituer la contribution de la raie du béryllium au blend en question, c'est-à-dire en réaliser la décomposition. Nous avons effectué cette décomposition au moyen de deux méthodes : une méthode purement numérique, fondée sur une technique de moindres carrés, et une méthode basée sur les résultats des spectres synthétiques en ETL. Nous discutons la validité de ces méthodes et comparons les résultats qu'elles fournissent.

6. Formation des raies de résonance du Be II dans le formalisme de l'équilibre cinétique

Pour le calcul de l'équilibre d'ionisation et d'excitation du béryllium dans l'atmosphère solaire, nous avons utilisé une méthode numérique due à Lites (1972) qui est fondée sur la méthode de la divergence du flux de Athay et Skumanich (1967), étendue au traitement simultané de plusieurs transitions radiatives à l'intérieur d'un modèle d'atome comprenant plusieurs états d'ionisation, chacun d'eux pouvant posséder un nombre relativement élevé de niveaux d'excitation. Après un bref exposé de la méthode et des paramètres atomiques et atmosphériques que nous avons utilisés, nous discutons les résultats obtenus. Ces derniers indiquent que le béryllium est significativement plus ionisé dans l'atmosphère solaire qu'il ne le serait dans les conditions de l'ETL, et que le rapport de la fonction-source des raies du doublet de résonance du Be II à la fonction de Planck est nettement supérieur à l'unité. Nous montrons alors que les résultats des calculs en EC permettent de rendre compte de manière satisfaisante du comportement centre-bord des raies du Be II. Sur la base de l'abondance obtenue de manière à ce que l'intensité des raies du Be II calculées de la sorte soit égale à l'intensité observée, nous donnons une prédiction de l'intensité des raies les plus importantes du Be I qui sont situées dans l'ultraviolet.

7. Conclusion

Après avoir analysé les causes d'erreur et estimé leur importance, nous obtenons finalement pour l'abondance solaire

du béryllium la valeur :

$$\log \epsilon(\text{Be}) \equiv \log [N(\text{Be})/N(\text{H})] + 12 = 1.15 \pm 0.20$$

Cette valeur confirme les déterminations antérieures de Grevesse (1968), de Hauge et Engvold (1968) et de Ross et Aller (1974).

Nous comparons ensuite notre résultat concernant l'abondance du béryllium dans l'atmosphère du Soleil aux valeurs correspondantes admises pour le système solaire d'une part, et pour la matière interstellaire de l'autre ; nous constatons que rien ne permet encore d'affirmer que le béryllium ait une abondance significativement différente dans l'un ou l'autre de ces milieux. Nous discutons alors rapidement les théories actuelles de l'origine du béryllium dans la matière interstellaire et les conditions de survie de cet élément dans l'atmosphère solaire. Nous évoquons enfin le problème posé par la corrélation apparente entre l'abondance stellaire du béryllium et le type spectral de l'étoile, corrélation que certains lient à un appauvrissement en béryllium du milieu interstellaire au cours du temps. Ce problème n'a pas encore trouvé de réponse définitive. Nous suggérons que cette corrélation pourrait être attribuée à des erreurs systématiques dans les déterminations d'abondance dues à des effets différentiels d'écarts à l'ETL.

Bibliographie restreinte

Athay, R.G. and Skumanich, A. : 1967, Ann. Astrophys. 30, 669

Grevesse, N. : 1968, Solar Phys. 5, 159

Hauge, O. and Engvold, O. : 1968, Astrophys. Letters 2, 235

Lites, B.W. : 1972, "Observation and analysis of the solar neutral
iron spectrum", University of Colorado-NCAR
cooperative, Ph. D. Thesis no 28

Ross, J.E. and Aller, L.H. : 1974, Solar Phys. 36, 11.

